玉米粉碎粒度对育肥猪颗粒饲料加工质量及猪生长性能的影响

倪海球[1]　李军国[1,2*]　于纪宾[1]　于治芹[1]　王　昊[1]　商方方[1]

（1.中国农业科学院饲料研究所，北京 100081；2.农业部饲料生物技术重点实验室，北京 100081）

摘　要：本试验旨在研究同一配方下，玉米不同粉碎粒度对颗粒饲料加工质量和育肥猪生长性能的影响。选用 1.5/2.0、2.0/2.0、2.0/2.5、2.5/2.5、2.5/3.0 和 3.0/3.0 mm 孔径的筛片对玉米进行粉碎，分别得到几何平均粒径为 303.91、346.08、356.81、358.51、373.29 和 387.7 μm 的玉米原料，采用同一配方和相同的加工参数（其他原料粉碎筛片孔径 2 mm，制粒调质温度 80 ℃、模孔直径 3 mm、长径比 9：1）加工成含不同粉碎粒度玉米的饲粮。选取 108 头平均体重为（62.68±5.59） kg 的"杜×长×大"杂交猪，随机置于 6 个组（每个组 3 个重复，每个重复 6 头猪，公母各占 1/2），分别饲喂含不同粉碎粒度玉米的饲粮，试验周期为 8 周。结果表明：随着筛片孔径的增大，粉碎能耗从 9.02 kW·h/t 降低到 6.86 kW·h/t，制粒能耗从 19.06 kW·h/t 升高到 22.30 kW·h/t；粗蛋白质体外消化率随玉米粉碎粒度的增加呈现上升的趋势，其中 2.5/2.5 mm 组最高，且显著高于 1.5/2.0 mm 组（$P<0.05$）；颗粒硬度 2.5/3.0、3.0/3.0 mm 组显著高于其他组（$P<0.05$）；随粉碎粒度的增加饲粮干物质表观消化率降低，其中 1.5/2.0 和 3.0/3.0 mm 组分别为 84.43%和 80.62%，后者比前者降低了 4.5%，且差异显著（$P<0.05$）；随玉米粉碎粒度的增加饲粮粗蛋白质表观消化率整体呈现下降的趋势，且 1.5/2.0 mm 组粗蛋白质表观消化率为 86.14%，与其他各组差异显著（$P<0.05$）；各组平均日增重和料重比均无显著性差异（$P>0.05$），2.5/2.5 mm 组平均日采食量最高，但与各组间无显著性差异（$P>0.05$）。根据本试验结果，建议育肥猪饲粮玉米粉碎粒度采用 2.5/2.5 mm 筛片孔径。

关键词：玉米；粉碎粒度；育肥猪；颗粒质量；生长性能

中图分类号：S816.9　　文献标识码：　　文章编号：

一直以来，畜牧业研究者对不同家畜饲料原料的最佳粉碎粒度尤为关注。一个饲料产品

收稿日期：2016－03－31

基金项目：公益性行业（农业）科研专项项目"饲料高效低耗加工技术研究与示范（20120315）"；现代农业产业技术体系北京市家禽创新团队项目；"十二五"国家科技支撑计划课题"安全优质饲料生产关键技术研发与集成示范（2011BAD26B04）"

作者简介：倪海球（1990—），男，江苏连云港人，硕士研究生，从事饲料加工与动物营养研究。E-mail: haiqiuni@163.com

*通信作者：李军国，研究员，硕士生导师，E-mail: lijunguo@caas.cn

的优劣，不仅取决于配方的好坏、原料的优劣，加工工艺亦对其具有重要的作用。而饲料粉碎粒度是加工工艺的重要指标，不仅影响饲料营养价值的发挥、动物的健康水平和生产性能，同时也影响颗粒饲料的加工品质和效率，从而影响饲料产品的经济效益和市场占有率。Mavromichalis 等[1]研究表明随着粉碎粒度减小，饲料营养成分与消化酶的接触机会增加，从而提高营养物质的消化率，但粉碎能耗却也随着粒度的减小显著增加。粉碎粒度占影响颗粒质量的因素的 20%左右[2]，一般情况下，细粒度的物料有利于调质，能有效改善颗粒饲料的品质[3-7]，而粉碎过粗会使颗粒出现裂纹[8]。谢正军等[9]采用粉碎粒径分别为 356、397 和 561 μm 的 3 种饲料制粒，发现随物料粒度的增大颗粒饲料的颗粒耐久性依次显著下降。但是也有研究者认为，物料的粉碎粒度大小对制粒效果没有显著的影响[2,10-11]。Hedde 等[12]报道，育肥猪饲喂以玉米为基础的饲粮，当粒度由粗磨(20%以下的微粒可通过 1.2 mm 筛)改为细磨(80%以上的微粒通过 1.2 mm 筛)时，增重提高 8%。Wondra 等[13]在总结若干粒度效果试验的数据后认为，生长肥育猪饲粮中玉米粒度平均大小由 1 200 μm 减少至 400 μm 时，粒度每减少 100 μm，增重效率提高 1.0%~1.5%。然而，以上国外学者的研究局限于 400 μm 以上的粉碎粒度，育肥猪应用原料粉碎粒度在 400 μm 以下的研究甚少；同时，在国内，粉碎粒度的研究对象也主要是仔猪，少有人研究育肥猪饲料的粉碎粒度。因此，本研究旨在通过研究玉米粉碎粒度对颗粒饲料加工质量及对育肥猪生长性能的影响，探讨育肥猪饲粮的玉米最佳粉碎粒度，为实际生产中提升育肥猪饲粮的品质提供数据依据，并对饲料生产和畜禽饲养起到指导作用。

1 材料与方法

1.1 试验饲粮及加工

1.1.1 试验饲粮

试验饲粮组成及营养水平见表 1。

表 1 试验饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the experimental diet (air-dry basis) %

原料 Ingredients	含量 Content	营养水平 Nutrient levels2）	含量 Content
玉米 Corn	60	消化能 DE/（MJ/kg）	13.05
膨化豆粕	8	粗蛋白质 CP	15.33

Puffing soybean meal			
小麦麸 Wheat bran	18	钙 Ca	0.53
玉米干酒糟及其可溶物 Corn DDGS	4	磷 P	0.37
棉籽粕 Cottonseed meal	4	赖氨酸 Lys	0.76
啤酒酵母 Brewer’s yeast	2	蛋氨酸＋半胱氨酸 Met+Cys	0.47
预混料 Premix[1)]	4		
合计 Total	100		

[1)]预混料为每千克饲粮提供 Premix provided the following per kg of the diet：VA 5 512 IU,VD_3 2 250 IU,VE 24 mg,VK_3 3 mg,VB_1 3 mg,VB_2 6 mg,VB_6 3 mg,VB_{12} 24 μg,泛酸 pantothenate 15 mg,叶酸 folic acid 1.2 mg,生物素 biotin 150 μg,Fe 70 mg,Cu 5 mg,Zn 70 mg,Mn 15 mg,I 0.3 mg,Se 0.3 mg。

[2)]粗蛋白质和消化能为实测值，其他为计算值。DE and CP were measured values, while the others were calculated values.

1.1.2 试验饲粮加工

采用 1.5/2.0、2.0/2.0、2.0/2.5、2.5/2.5、2.5/3.0 及 3.0/3.0 mm 孔径筛片组合对玉米进行粉碎，以制备不同粉碎粒度的玉米，记录粉碎时间、产量及耗电量。其他需要粉碎的原料采用 2.0 mm 孔径的筛片进行粉碎。所有原料准备好后，按照配方中的比例要求，配制 6 种含不同粉碎粒度玉米的饲粮，然后在环模模孔直径 3.0 mm、模孔长径比 9：1、调质温度 80 ℃的条件下进行制粒，记录制粒时间、产量及耗电量。

1.2 试验动物与饲养管理

选用健康且平均体重为（62.68±5.59） kg 的杜×长×大商品代育肥猪 108 头，随机分成 6 个组，每个组 3 个重复，每个重复 6 头猪，公母各占 1/2，进行为期 8 周的饲养试验。试验在中国农业科学院南口中试基地进行，采用公母混养的圈养方式进行饲养，试验期间试验猪自由采食，自由饮水，保持猪舍清洁和通风，严格控制室温并定期消毒。于第 8 周末早晨 08：00 空腹称重。

1.3 检测指标与方法

1.3.1 颗粒饲料加工指标

1.3.1.1 粉碎粒度

每个组在每个取样点取样 3 次，样品的几何平均粒径采用国家标准 GB 6971—1986《饲料粉碎机 试验方法》[14]中的十四层筛分法测定。

1.3.1.2 耐久性

每个组在每个取样点取样 3 次，样品的耐久性检测采用美国农业工程协会标准方法——回转箱法[15]。

1.3.1.3 颗粒硬度

样品颗粒硬度的测定参照 NY/T 2806—2015《饲料检验化验员》[16]中颗粒饲料硬度的测定方法检测。

1.3.1.4 粗蛋白质体外消化率

样品粗蛋白质含量用凯氏定氮法测定。粗蛋白质体外消化率参照王卫国等[17]方法进行计算。

1.3.1.5 能耗计算

能耗的计算公式：

耗电量（kW·h）=设备的运行电流（A）×220 V×通电运行时间（h）。

1.3.2 育肥猪生长性能

生长性能指标测定以重复为单位计算试验猪末重、平均日采食量、平均日增重及料重比。

1.3.3 饲粮养分消化率指标

在饲养的最后 1 周每天收集每组猪所产鲜粪，混匀后称重，按每 100 g 粪加 20 mL 5%HCl 进行处理，然后在 65 ℃烘箱烘 72 h，置于室温条件下自然回潮 24 h，粉碎过 40 目筛，制成风干样，保存备用、待测。参照国家标准方法测定饲粮和粪便中的粗蛋白质、干物质、酸性不溶灰分含量，分别计算粗蛋白质和干物质表观消化率。

1.4 数据处理

试验数据以平均值±标准差表示，并采用软件 SAS 9.2 对其进行协方差分析和单因素方差分析（one-way ANOVA），Duncan 氏法多重比较检验差异的显著性，显著性水平为 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 玉米粉碎粒度对加工能耗的影响

2.1.1 玉米粉碎粒度对粉碎能耗的影响

采用不同孔径的筛片对玉米进行粉碎，粉碎每吨原料耗电量及变化趋势见图 1。由图可知，在玉米粉碎过程中，粉碎每吨原料耗电量随着筛片孔径的增大而减小。筛片孔径从 1.5/2.0 mm 增加到 3.0/3.0 mm 时，每吨玉米的粉碎耗电量从 9.02 kW·h 降低到 6.86 kW·h，能耗降

低 23.95%。对粉碎机筛片孔径(*X*)与粉碎能耗(*Y*)作线性回归(n=6)得出：Y=－0.438X+9.400，R^2 为 0.990，经 *F* 检验 P<0.01，即粉碎机筛片孔径与玉米粉碎能耗之间有着较好的线性关系。

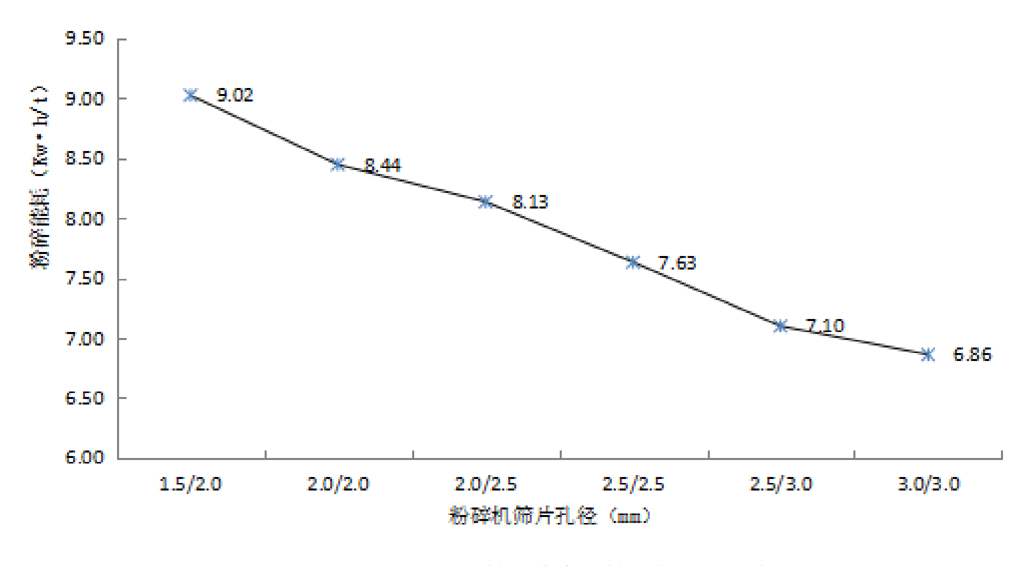


图1　不同粉碎粒度对粉碎能耗的影响

Fig.1　Effects of different grinding particle sizes on the energy consumption of grinding

2.1.2　玉米粉碎粒度对制粒能耗的影响

使用不同孔径筛片对制粒能耗的影响见图 2。由图可知，制粒每吨饲料耗电量随着粉碎粒度的增大而增大。筛片孔径从 1.5/2.0 mm 增加到 3.0/3.0 mm 时，每吨饲料制粒耗电量从 19.06 kW·h 升高到 22.30 kW·h，能耗提高了 17.00%。对粉碎机筛片孔径(*X*)与制粒能耗(*Y*)作线性回归(n=6)得出：Y=0.625X+18.27，R^2 为 0.959，经 *F* 检验 P<0.01，即粉碎机筛片孔径与饲料制粒能耗之间有着较好的线性关系。

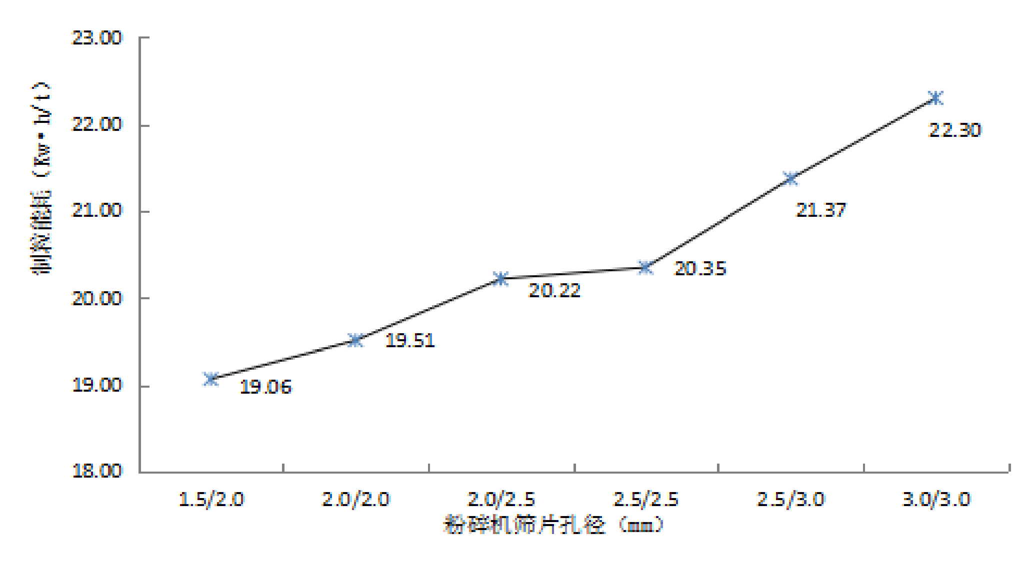


图2　不同粉碎粒度对制粒能耗的影响

Fig.2　Effects of different grinding particle sizes on the energy consumption of pelletizing

2.1.3　玉米粉碎粒度对粉碎和制粒能耗的影响

使用不同孔径筛片对粉碎和制粒能耗（粉碎能耗×60%+制粒能耗）的影响见图 3。由图可知，筛片孔径从 1.5/2.0 mm 增大到 2.5/2.5 mm，粉碎+制粒每吨饲料耗电量为 24.48～25.10 kW·h，变化不明显；而当筛片孔径在 2.5/2.5 mm 以上时，粉碎+制粒每吨饲料耗电量随筛片孔径的增大而增加。所以在进行制粒时玉米粉碎粒度不宜过粗，较粗的粒度反而增加产品的加工能耗。

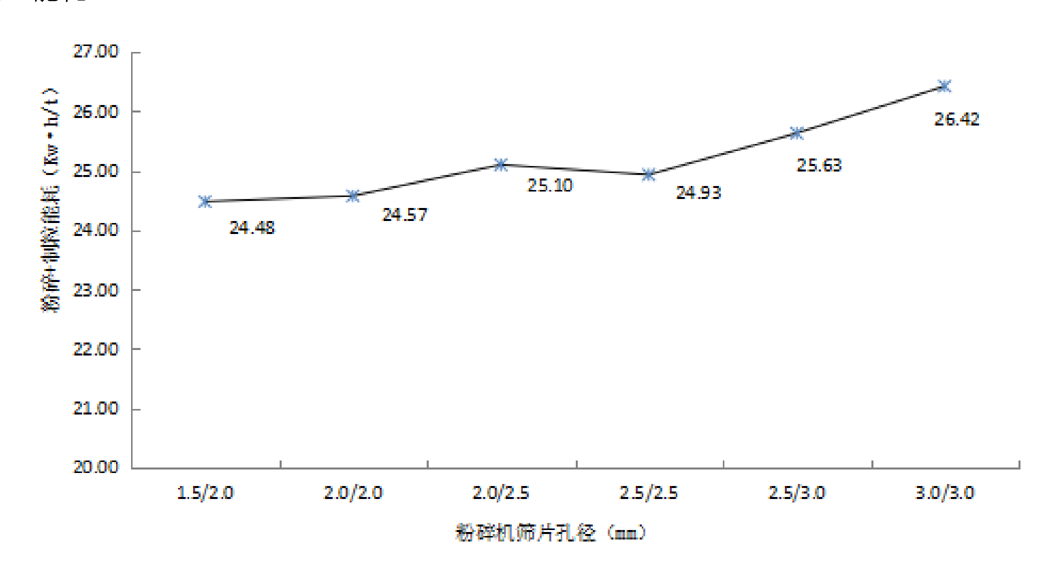


图3　不同粉碎粒度对粉碎和制粒能耗的影响

Fig.3　Effects of different grinding particle sizes on the energy consumption of grinding and pelletizing

2.2　玉米粉碎粒度对颗粒饲料加工质量的影响

不同玉米粉碎粒度组的颗粒饲料加工质量见表 2。由表 2 可知，采用不同孔径的筛片粉碎玉米对玉米的几何平均粒径及颗粒饲料的耐久性、硬度和粗蛋白质体外消化率均会有影响。筛片孔径从 1.5/2.0 mm 增加到 3.0/3.0 mm，玉米的几何平均粒径从 303.91 μm 线性增大到 387.70 μm，且除了 2.0/2.5 与 2.5/2.5 mm 组差异不显著（$P>0.05$）外，其他组之间均有显著性差异（$P<0.05$）；颗粒硬度随玉米粉碎粒度的增加整体呈上升的趋势且差异显著（$P<0.05$）；颗粒耐久性随粉碎粒度的增加呈现降低趋势，但筛片孔径从 1.5/2.0 mm 增加到 3.0/3.0 mm 时没有显著性差异，2.5/3.0 和 3.0/3.0 mm 组显著低于其他组（$P<0.05$）；粗蛋白质体外消化率随粉碎粒度的增加先升高后降低，其中 1.5/2.0 mm 组显著高于其他组（$P<0.05$）。

表2　不同粉碎粒度对育肥猪颗粒饲料加工质量的影响

Table 2　Effects of different grinding particle sizes on pellet feed processing quality in growing-finishing pigs

指标 Indices	筛片孔径 Screen surface aperture/mm					
	1.5/2.0	2.0/2.0	2.0/2.5	2.5/2.5	2.5/3.0	3.0/3.0
几何平均粒径 Geometric mean particle size/μm	303.91±5.87[a]	346.08±1.53[b]	356.81±3.49[c]	358.51±2.57[c]	373.29±6.32[d]	387.70±1.42[e]
颗粒硬度 Pellet hardness/N	45.21±4.50[a]	47.87±4.38[b]	51.33±3.93[c]	48.80±4.99[b]	53.67±3.45[d]	54.07±3.61[d]
耐久性 Durableness/%	93.01±0.50[c]	92.57±0.38[c]	92.74±0.22[c]	92.46±0.14[bc]	91.78±0.52[ab]	91.16±0.41[a]
粗蛋白质体外消化率 The digestibility of crude protein *in vitro*/%	79.46±1.05[a]	80.42±0.85[abc]	81.19±0.82[bc]	81.44±0.32[bc]	80.09±0.87[ab]	81.12±0.74[bc]

同行数据肩标不同小写字母者为差异显著（*P*<0.05）。下表同。

Values in the same row with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05). The same as below.

2.3 玉米粉碎粒度对育肥猪生长性能的影响

不同玉米粉碎粒度组的育肥猪生长性能见表 3。运用协方差排除了协变量初重对因变量的影响后，由表可知，末重 2.5/2.5 mm 组最高，达到了 120.93 kg，与 2.0/2.5 和 3.0/3.0 mm 组相比分别提高了 18.45%和 24.75%，差异显著（*P*＜0.05）；平均日采食量 1.5/2.0 mm 组最高，与 2.0/2.0、2.0/2.5、2.5/2.5 mm 组差异不显著（*P*＞0.05），与其他组差异显著（*P*＜0.05）；平均日增重各组间差异均不显著（*P*>0.05），其中 2.5/2.5 mm 组最高；2.5/3.0 mm 组料重比最低，但各组差异不显著（*P*>0.05）。

表 3 不同粉碎粒度对育肥猪生长性能的影响

Table 3 Effects of different grinding particle sizes on growth performance of growing-finishing pigs

指标 Indices	筛片孔径 Screen surface aperture/mm					
	1.5/2.0	2.0/2.0	2.0/2.5	2.5/2.5	2.5/3.0	3.0/3.0
初重 Initial body weight/kg	66.92±10.25	64.22±7.51	62.61±6.08	62.06±5.35	61.67±5.63	61.11±5.15
末重 Final body weight/kg	113.09±1.53[ab]	104.83±7.91[a]	102.09±8.76[a]	120.93±7.11[b]	106.72±5.27[ab]	96.94±12.78[a]
平均日采食量 ADFI/kg	2.59±0.00[b]	2.42±0.07[ab]	2.23±0.14[ab]	2.44±0.12[ab]	2.17±0.29[a]	2.18±0.16[a]
平均日增重 ADG/kg	0.78±0.05	0.77±0.03	0.69±0.07	0.86±0.07	0.85±0.20	0.68±0.18
料重比 F/G	3.44±0.01	3.16±0.09	3.39±0.38	3.17±0.14	2.96±0.08	3.33±0.63

2.4 玉米粉碎粒度对育肥猪饲粮养分消化率的影响

不同玉米粉碎粒度组的饲粮养分表观消化率见表 4。由表 4 可知，玉米粉碎粒度的变化对育肥猪饲粮粗蛋白质表观消化率的影响较为显著。随着玉米粉碎粒度的增加，粗蛋白质表观消化率显著性降低，与 1.5/2.0 mm 组相比，其余 5 个组分别降低了 3.9%、3.3%、2.9%、3.7%和 6.2%，且各组之间差异显著（$P<0.05$）；各组干物质表观消化率随粉碎粒度的增加呈现下降的趋势，除 2.0/2.5 mm 与 2.5/3.0 mm 组间差异不显著外（$P>0.05$），其余各组之间差异显著（$P<0.05$），且 3.0/3.0 mm 组较 1.5/2.0 mm 组降低最高达 4.5%。

表 4 玉米粉碎粒度对育肥猪饲粮养分消化率的影响

Table 4 Effects of grinding particle sizes of corn on the nutrient digestibility of diet in growing-finishing pigs

指标 Indices	筛片孔径 Screen surface aperture/mm					
	1.5/2.0	2.0/2.0	2.0/2.5	2.5/2.5	2.5/3.0	3.0/3.0
干物质表观消化率 Dry matter apparent digestibility	84.43±0.11[d]	82.41±0.25[c]	81.68±0.35[b]	83.00±0.14[c]	81.67±0.68[b]	80.62±1.12[a]
粗蛋白表观消化率 Crude protein apparent digestibility	86.14±0.21[e]	82.82±0.28[b]	83.30±0.1[cd]	83.67±0.29[d]	82.94±0.14[bc]	80.80±0.32[a]

3 讨 论

3.1 不同组合的筛片孔径对玉米粉碎粒度的影响

为了提高饲料品质，粉碎是饲料加工过程中必不可少的工艺手段，饲料营养价值与粉

碎加工密切相关[18-19]。然而影响粉碎效果的因素有很多，如筛孔直径、开孔率、筛片厚度、吸风量以及筛孔形式等[20-21]。饲料粉碎的最终效果，最科学的表示方法通常用几何平均粒径来表示，即饲料或原料样品的平均颗粒的大小。目前，在饲料生产企业，饲料原料主要通过调整粉碎机的筛片孔径得到不同的粉碎粒度。王卫国等[22]使用 FSP 112×30 55 kW 型锤片式粉碎机在 3 种孔径（5.0、7.0 和 8.0 mm）的筛片下，粉碎玉米和豆粕 2 种原料，研究发现粉碎物的几何平均粒径随筛孔直径减小而降低，不同筛片孔径下，同一种原料之间的部分组的几何平均粒径差异不显著；同一筛片孔径下，不同原料之间的几何平均粒径有显著性差异[23]。秦永林[24]使用 SFSP 112×30 型锤片粉碎机在 6 种孔径（2.5、3.0、4.5、5.0、7.0 和 8.0 mm）的筛片下粉碎玉米，玉米的几何平均粒径从 249.0 μm 升高到 535.5 μm，研究发现筛片孔径与几何平均粒径之间呈线性关系。本试验采用 1.5/2.0、2.0/2.0、2.0/2.5、2.5/2.5、2.5/3.0 和 3.0/3.0 mm 6 种不同的粉碎机组合筛片孔径对玉米进行粉碎，分别得到了几何平均粒径为 303.91、346.08、356.81、358.51、373.29 和 387.70 μm 的玉米，研究发现玉米的几何平均粒径随着粉碎机筛片孔径的增大呈增大趋势，除了 2.0/2.5 和 2.5/2.5 mm 组之间差异不显著外，其他各组之间均呈现显著性差异（$P<0.05$），这与上述的研究结论一致。

3.2 玉米粉碎粒度对能耗的影响

粉碎粒度的大小不仅影响饲料养分利用率、动物生产性能，在很大程度上也影响饲料的加工成本，粉碎机动力配备占饲料厂总配备的 1/3 或更多[25]。Mani 等[26]研究表明，原料粉碎粒度对粉碎机能耗有显著影响；筛片孔径越小，能耗越高，细粉碎不仅增加了能量的耗费，还降低了粉碎机产量，因此在采用细粉碎时应着重考虑其粉碎成本[25]。秦永林[24]报道用 0.6、1.0、1.5、2.5 和 4.0 mm 筛片孔径的锤片粉碎机粉碎玉米时的能耗从 32 kW·h/t 降低到了和 8 kW·h/t，粉碎豆粕的能耗从 48 kW·h/t 降低到了 9 kW·h/t，将原料粉碎粒度(X)与粉碎机能耗(Y)数据进行相关曲线拟合回归(n=5)，得到的回归方程为：玉米，Y=0.000 3X^2－0.417X+137.56，R^2=0.985 2，$P<0.05$；豆粕，Y=0.000 4X^2－0.504 8X+165.23，R^2=0.990 6，$P<0.05$。王卫国等[21]研究了玉米、豆粕和麦麸等 5 种饲料原料粉碎粒度与粉碎能耗的关系，结果也表明降低饲料粒度，粉碎能耗增加，特别是当筛孔直径达到 1.0 mm 及更小时，粉碎能耗增加的幅度更大，相对于 1.5 mm 筛片，筛孔直径 0.6 mm 的筛片粉碎玉米、豆粕和麦麸耗电量分别增加至 3.17、3.67 和 2.69 倍，而其中玉米增加的耗电量大于在本试验中增加的幅度，原因可能是不同的机型和玉米的水分等造成的差异。本试验研究表明，随着玉米粉碎粒度由 303.91 μm 增加到 387.70 μm，粉碎能耗降低了 23.95%，这与上述研究结果一致；而随着玉米粉碎粒度由 303.91 μm 增加到 387.70 μm，制粒能耗增加了 17.00%，这主要是因为粉碎粒

度越粗，越会增加物料与环形模具和辊筒的磨损，导致单位时间产量降低等不利情况[27]。所以，粉碎粒度过粗或过细对生产成本的节约均有不利影响。

3.3　玉米粉碎粒度对颗粒饲料加工质量的影响

参与饲料制粒加工的各个混合组分自身的粒度分布对于制粒质量具有重要影响。在调质制粒系统中，原料的粉碎粒度对制粒效果的影响占 15%~20%[2]。粉碎粒度越小使得物料表面积越大，在调质过程中与蒸汽接触越充分，使热量和水分的传递通畅，糊化效果好，制粒易成形[28]。谢正军等[9]发现颗粒饲料的稳定性随物料粒度的增大(粉碎粒径分别为 356、397 和 561 μm)而依次显著下降；程译锋等[29]研究也发现粉状饲料淀粉糊化度随饲料粉碎粒度(分别为 505、303、214、178 和 81 μm)减小而提高；研究表明，饲料颗粒质量随粉碎机筛孔孔径(分别为 1.5、2.0 和 3.0 mm)增加即玉米粉碎粒度加大而显著下降[30]；对于粉碎豆粕也得到了类似结果，筛孔孔径(分别为 2.5、2.0 和 1.5 mm)逐渐减小时，制粒后颗粒料的稳定度和硬度呈现增加的趋势[11]。本试验研究发现，随着玉米粉碎粒度（分别为 303.91、346.08、356.81、358.51、373.29 和 387.70 μm）的增大，饲料耐久性呈下降的趋势，由 93.01%降低到了 91.16%，这主要是因为粉碎过粗会导致颗粒表面产生裂纹[8]，使饲料粉化率升高，耐久性下降，这与上述研究结果一致；但随着粉碎粒度的增加，颗粒硬度呈现了逐渐增大的趋势，这与前人的研究相反，可能是因为其他原料均采用了 2.0 mm 的筛片进行粉碎，导致 2.5/3.0 和 3.0/3.0 mm 组在混合过程中产生了一定的分级现象所导致。此外，本试验中，粗蛋白质体外消化率随着粉碎粒度的增加呈现现升高后降低的趋势，其中 2.5/2.5 mm 组最高，达到了 81.44%，且与 1.5/2.0 和 3.0/3.0 mm 组存在显著性差异。总体而言，在一定的范围内饲料颗粒质量随着粉碎粒度的增加呈降低趋势，这与王铁良等[30]研究结果一致。

3.4　玉米粉碎粒度对育肥猪生长性能的影响

饲料粉碎粒度对猪生产性能的影响主要表现在猪的年龄、谷物种类和粒度大小三者之间的关系上。王卫国等[31]选用筛孔直径分别为 4.5、3.0 和 2.5 mm 的筛片粉碎豆粕、玉米并配制全价料来饲喂 23 kg 体重的仔猪，结果表明：在相同条件下，3.0 mm 组的料重比比 4.5 mm 组增加了 10.1%，比 2.5 mm 组增加了 9.6%。Lawrence 等[32]报道，对饲料原料进行适当的粉碎能使猪获得最佳生长性能和提高饲料利用率。Healy 等[33]研究也表明，降低谷物粉碎粒度可以改善断奶仔猪的生长性能。Wondra 等[25]曾做了玉米粉碎粒度对生长育肥猪生长性能的试验，发现饲粮中玉米粒径平均大小由 1 200 μm 减至 400 μm 时，粒径大小每减小 100 μm，饲料效率提高 1.0%~1.5%。但饲料粉碎并非越细越好，过细的粉碎增加了能量的耗费，降低了粉碎机产量，还可能诱发胃肠道溃疡[34]。Cabrera 等[35]报道玉米和 2 种高粱的细粉碎(粒度

小于 600 μm)将给胃部形态带来负面影响。本试验研究发现，当玉米粉碎粒度为 358.51 μm（即筛片孔径为 2.5/2.5 mm）时，生长猪末重、平均日增重最高，分别为 120.93、0.86 kg，这可能是因为该组饲料粗蛋白质体外消化率最高、颗粒硬度较低，由此提高了生长猪对饲粮的消化利用率，从而提高了平均日增重；而 3.0/3.0 mm 组末重最低为 96.94 kg，平均日增重最低为 0.68 kg，可能是因为该组饲料的颗粒硬度最高，影响生长猪的适口性，从而降低了采食量，也可能因为在饲养过程中，该组腹泻率特别严重，从而也影响其对饲粮的消化吸收；1.5/2.0 mm 组玉米粉碎粒度最低为 303.91 μm，颗粒硬度、粗蛋白质体外消化力均最低，分别为 45.21 N 和 79.46%，颗粒耐久性、平均日采食量、料重比均最高，分别为 93.01%、2.59 kg 和 3.44，这可能是因为粉碎粒度过小，导致生长猪出现了胃肠损伤和角质化现象[36]，具体原因有待以后进一步研究。总体而言，从生长育肥猪生长性能来看，饲粮中玉米粉碎选择筛片孔径为 2.5/2.5 mm 时育肥猪生长性能最好。

3.5　玉米粉碎粒度对育肥猪营养物质表观消化率的影响

饲料原料粉碎粒度的大小对营养物质的消化利用有直接关系，通常情况下，粒度越小，与消化酶的接触面积越大，养分消化率越高。李星等[37]报道分别用 360、680 和 1 150 μm 粒度的饲料对仔猪进行消化试验，结果发现随着饲料粒度的减小，饲料中有机物、粗蛋白质和干物质的消化率均得到提高。Mavromichalis 等[1]试验发现，当小麦粉碎粒度从 1 300 μm 降到 600 μm，生长肥育猪的饲粮干物质表观消化率和氮表观消化率分别从 83.7%和 80.4%增加到 87.6%和 85.5%；当小麦粉碎粒度从 600 μm 降到 400 μm，饲粮干物质和氮表观消化率分别从 84.7%和 81.9%增加到 87.3%和 86.6%。Fastinger 等[38]报道，随着饲粮中豆粕粒度的降低(分别为 900、600、300 和 150 μm)，生长猪(28 kg)对能量的表观消化率有增加的趋势，但差异不显著；Lahaye 等[40]发现生长猪饲粮中小麦粒度从 1 000 μm 降至 500 μm，能显著提高氮以及大部分必需和非必需氨基酸回肠表观及真消化率，对内源氮排泄没有显著影响。本试验研究发现，当玉米粉碎粒度从 303 μm 升高到 388 μm，饲料干物质和蛋白质表观消化率分别从 84.43%和 86.14%降低到 80.62%和 80.80%，但 2.5 mm 组干物质和蛋白质表观消化率均高于 2.0/2.0 和 2.0/2.5 mm 组，这与前人研究结果不一致，这可能是因为本试验的玉米粉碎粒度主要集中在 300~400 μm 以内，变化范围小，而且饲粮配方中其他原料均采用 2.0 mm 筛片孔径进行粉碎，在混合之后进行制粒的过程对养分的表观消化率产生了影响，导致养分表观消化率并不完全随着粉碎粒度的增加而降低。

4　结　论

① 粉碎机筛片孔径从 1.5/2.0 mm 增大到 3.0/3.0 mm，粉碎能耗逐渐降低，制粒能耗逐

渐增加，但粉碎和制粒能耗在 1.5/2.0 mm 到 2.5/2.5 mm 之间变化不明显，2.5/2.5 mm 以上随筛片孔径增大而增大；玉米的几何平均粒径变化范围为 303.91～387.70 μm，粗蛋白质体外消化率呈现先升高后降低趋势，其中 2.5/2.5 mm 组颗粒饲料粗蛋白质体外消化率最高。

② 玉米粉碎粒度对育肥猪末重和平均日采食量有显著影响，但各组之间平均日增重、料重比无显著性差异，其中 2.5/2.5 mm 组末重、平均日增重最大，平均日采食量仅低于 1.5/2.0 mm 组；蛋白质表观消化率和干物质表观消化率随着粉碎粒度（303.91～387.70 μm）的减小而显著升高。

③ 综合本试验玉米粉碎粒度对颗粒饲料的加工能耗、加工质量和育肥猪生长性能的影响结果，建议育肥猪颗粒料中玉米的粉碎粒度采用 2.5/2.5 mm 筛片孔径（玉米几何平均粒径 358 μm）为宜。

参考文献：

[1] MAVROMICHALIS I,HANCOCK J D,SENNE B W,et al.Enzyme supplementation and particle size of wheat in diets for nursery and finishing pigs[J].Journal of Animal Science,2000,78(12):3086–3095.

[2] 李忠平.粉碎粒度对饲料加工生产性能的影响[J].饲料工业,2001,22(4):5–7.

[3] REECE F N,LOTT B D,DEATON J W.Effects of environmental temperature and corn particle size on response of broilers to pelleted feed[J].Poultry Science,1986,65(4):636–641.

[4] WONDRA K J,HANCOCK J D,BEHNKE K C,et al.Effects of particle size and pelleting on growth performance,nutrient digestibility,and stomach morphology in finishing pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(3):757–763.

[5] ANGULO E,BRUFAU J,ESTEVE-GARCIA E.Effect of a sepiolite product on pellet durability in pig diets differing in particle size and in broiler starter and finisher diets[J].Animal Feed Science and Technology,1996,63(1/2/3/4):25–34.

[6] BEHNKE K C.Factors influencing pellet quality[J].Feed Technology,2001,5(4):19–22.

[7] SVIHUS B,KLØVSTAD K H,PEREZ V,et al.Physical and nutritional effects of pelleting of broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill[J].Animal Feed Science and Technology,2004,117(3/4):281–293.

[8] 杨在宾,杨维仁.饲料配合工艺学[M].北京:中国农业出版社,1997.

[9] 谢正军,易炳权.粉碎对饲料质量和加工成本的影响[J].中国饲料,2001(22):18–19.

[10] REECE F N,LOTT B D,DEATON J W.The effects of hammer mill screen size on ground

corn particle size,pellet durability,and broiler performance[J].Poultry Science,1986,65(7):1257–1261.

[11] KOCH K.Hammermills and roller mills[R]//MF-2048 feed manufacturing.Manhattan:Kansas State University,1996.

[12] HEDDE R D,LINDSEY T Q,PARISH R C,et al.Effect of diet particle size and feeding of H2-receptor antagonists on gastric ulcers in swine[J].Journal of Animal Science,1985,61(1):179–186.

[13] WONDRA K J,HANCOCK J D ,KENNEDY G A ,et al.Reducing particle size of corn in lactation diets from 1,200 to 400 micrometers improves sow and litter performance[J].Journal of Animal Science,1995,73(2):421–426.

[14] 国家标准局.GB 6971—1986 饲料粉碎机 试验方法[S].北京:中国标准出版社,1987.

[15] 韩广振.颗粒饲料耐久性指数测试仪及其在饲料品质检测中的应用[J].饲料与畜牧:新饲料,2011(3):26–30.

[16] 中华人民共和国农业部.NY/T 2806—2015 饲料检验化验员[S].北京:中国农业出版社,2015:89–90.

[17] 王卫国,李石强,张磊,等.六种饲料原料粉碎粒度与蛋白质溶解度关系研究[J].饲料工业,2002,23(5):6–8.

[18] 王德福.影响颗粒饲料颗粒质量的因素分析[J].饲料博览,2002(6):24–25.

[19] 谭清华.影响颗粒饲料颗粒质量的因素[J].中国禽业导刊,2006,22(22):29.

[20] 程宗佳.饲料生产的质量管理方法及试验参数对动物生产性能的影响(二)饲料粉碎粒度[J].饲料广角,2004(21):29–31.

[21] 王卫国,付旺宁,黄吉新,等.饲料粉碎粒度与能耗及蛋白质体外消化率的研究[J].饲料工业,2001,22(10):33–37.

[22] 王卫国.朱礼海,廖国平.产蛋鸡饲料的粉碎粒度研究[J].饲料工业,2002,23(2):5–7.

[23] 李霞.饲料粉碎粒度在不同调制方式下对早期断奶仔猪生产性能和养分消化的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2007.

[24] 秦永林.锤片式粉碎机性能对常规饲料粉碎效果影响的研究[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2009.

[25] WONDRA K J,HANCOCK J D,BEHNKE K C,et al.Effects of mill type and particle size uniformity on growth performance,nutrient digestibility,and stomach morphology in finishing

pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(9):2564–2573.

[26] MANI S,TABIL L G,SOKHANSANJ S.Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws,corn stover and switchgrass[J].Biomass and Bioenergy,2004,27(4):339–352.

[27] 王红英,张树阁,樊增绪.影响制粒机生产率的因素[J].饲料工业,2002,23(4):5–7.

[28] 张亮,杨在宾,杨维仁,等.制粒温度和粉碎粒度对颗粒饲料品质的影响[J].饲料工业,2013(23):25–29.

[29] 程译锋,袁信华,过世东.加工对饲料蛋白质体外消化率和糊化度的影响[J].中国粮油学报,2009,24(2):125–128.

[30] 王铁良,吴颖,王军.玉米粉碎粒度对乳猪颗粒料质量的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2010(5):86–87.

[31] 王卫国,陈四勇,宁锋,等.仔猪配合饲料的粉碎粒度研究[J].饲料工业,2000,21(11):22–24.

[32] LAWRENCE K R,HASTAD C W,GOODBAND R D,et al.Effects of soybean meal particle size on growth performance of nursery pigs[J].Journal of Animal Science,2003,81(9):2118–2122.

[33] HEALY B J,HANCOCK J D,KENNEDY G A,et al.Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum for nursery pigs[J].Journal of Animal Science,1994,72(9):2227–2236.

[34] AYLES H L,FRIENDSHIP R M,BALL R O.Effect of dietary particle size on gastric ulcers,assessed by endoscopic examination,and relationship between ulcer severity and growth performance of individually fed pigs[J].Swine Health and Production,1996,4(5):211–216.

[35] CABRERA M R,BRAMEL-COX P J,HINES R H,et al.Sorghum genotype and particle size affect growth performance,nutrient digestibility,and stomach morphology in finishing pigs[R].Swine Day Report-93,Manhattan:Kansas State University,1993:129.

[36] 王凤红,刘建平,卢红卫,等.饲料粉碎粒度对饲料品质和猪生产性能的影响[J].饲料与畜牧:新饲料,2010(2):18–20.

[37] 李星,冯尚连,谷建勇.原料粒度、入模温度对仔猪生长性能和消化的影响[J].粮食与饲料工业,2001(1):38–39.

[38] FASTINGER N D,MAHAN D C.Effect of soybean meal particle size on amino acid and energy digestibility in grower-finisher swine[J].Journal of Animal Science,2003,81(3):697–704.

[39] LAHAYE L,GANIER P,THIBAULT J N,et al.Technological processes of feed manufacturing affect protein endogenous losses and amino acid availability for body protein deposition in pigs[J].Animal Feed Science and Technology,2004,113(1/2/3/4):141–156.

Grinding Particle Sizes of Corn Affect the Pellet Feed Processing Quality and Growth Performance of Growing-Finishing Pigs

NI Haiqiu[1] LI Junguo[1,2*] YU Jibin[1] YU Zhiqin[1] WANG Hao[1] SHANG Fangfang[1]

（1. *Feed Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Bejing* 100081, *China*; 2. *Key Laboratory of Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture, Beijing* 100081, *China*）

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of the different grinding particle sizes of corn on the processing quality of pellet feed and growth performance of finishing pigs under the same formula. Six different aperture sizes (1.5/2.0, 2.0/2.0, 2.0/2.5, 2.5/2.5, 2.5/3.0 and 3.0/3.0 mm) of screen surfaces were used to crush the corn for obtaining corn raw material with the geometric average particle size of 303.91, 346.08, 356.81, 358.51, 373.29 and 387.7 μm, respectively, and the diets with different grinding particle sizes of corn were prepared under the same formula and the same processing parameters (die diameter was 3 mm, the length diameter was 9∶1, and modulating temperature was 80 ℃). Then one hundred and eight finishing pigs were randomly allocated into 6 groups with 3 replicates per group and 6 pigs (male∶female was 1∶1) in each replicate. The pigs were fed with the corn of different grinding particle sizes for eight weeks. The results showed that the grinding energy consumption was reduced from 9.02 to 6.86 kW•h/t, and the pelletizing energy consume was increased from 19.06 to 22.30 kW•h/t with the particle size increasing. *In vitro* crude protein digestibility presented ascendant trend with the increase of the granularity of corn, which in 2.5/2.5 mm group was the highest and significantly higher than that in 1.5/2.0 mm group (P<0.05). Hardness of 2.5/3.0 and 3.0/3.0 mm groups was significantly higher than that of the other groups (P<0.05). With the increase of particle size, the apparent digestibility of dry matter was reduced, which in 1.5/2.0 and 3.0/3.0 mm groups were 84.43% and 80.62%, respectively, and the latter was 4.5% lower than the former (P<0.05). With the increase of particle size, the apparent digestibility of crude protein presented the downward trend overall, which in 1.5/2.0 mm group was 86.14%, and with a significant difference compared with the other groups (P<0.05). Average daily gain and the ratio of feed to gain were not significant difference among all groups (P>0.05), and the highest average daily feed intake was in 2.5/2.5 mm group, but there was no significant difference among groups either (P>0.05). According to the results of our experiment, screen surface with 2.5/2.5 mm aperture size is recommended for grinding corn in diet of finishing pigs

Key words: corn; grinding particle size; finishing pigs; particle quality; growth performance

---

*Corresponding author, professor, E-mail: lijunguo@caas.cn (责任编辑　田艳明)